



УДК 531.383

## ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБКИ ГІРОВЕРТИКАЛІ ПРИ ХИТАВИЦІ ОБ'ЄКТА

Нестеренко О.І.<sup>1</sup>, Платов І.М.<sup>2</sup>, Бугайов Д.В.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

ORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0000-0002-5564-0182>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-9587-9625>, <sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0002-9691-8654>

E-mail: <sup>1</sup>[oleg.i.nesterenko@gmail.com](mailto:oleg.i.nesterenko@gmail.com), <sup>2</sup>[ilya\\_platov@ukr.net](mailto:ilya_platov@ukr.net), <sup>3</sup>[myscience@engineer.com](mailto:myscience@engineer.com)

Copyright © 2021 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v14i3.2351

**Анотація.** Гіровертикаль – гіроскопічний прилад, призначений для визначення орієнтації об'єкта відносно площини горизонту (кутів тангажу і крену). Дана робота присвячена дослідженню впливу хитавиці об'єкта на похибку гіровертикалі та її зменшенню. Причиною виникнення похибок при хитавиці є прискорення, яке виникає у місці встановлення гіровертикалі, і яке збурює систему корекції гіроскопу за сигналами акселерометрів (індикаторів горизонту). Для гіровертикалей найбільш поширені наступні типи корекції: пропорційна, пропорційно-інтегральна, постійна, змішана, а для безплатформної гіровертикалі – це і фільтр Калмана та його різноманітні модифікації. Вибір того чи іншого типу залежить від вирішуваних задач і наявних можливостей у застосуванні складних типів корекції. В даній роботі досліджується гіровертикаль з постійною корекцією, оскільки вона має ряд переваг саме у роботі при хитавиці об'єкта. Запропоновано спосіб зменшення похибки шляхом автоматичного вимикання корекції за аналізом сигналів індикаторів горизонту, теоретично обґрунтована необхідність використання смугового фільтру для цих сигналів, запропонована методика вибору параметрів алгоритму вимикання корекції з точки зору мінімізації похибки гіровертикалі при хитавиці. Наведений приклад розрахунку параметрів системи корекції за запропонованою методикою. Для перевірки правильності розрахунків та підтвердження ефективності методики були використані дані, отримані під час стендових випробувань гіровертикалі MRU-B2 компанії Inertial Labs, побудованої на мікроемеханічних датчиках. Виконано напівнатурне моделювання роботи гіровертикалі з запропонованим способом зменшення похибки при хитавиці. Результати досліджень підтвердили ефективність запропонованої методики та правильність аналітичних розрахунків, завдяки застосуванню відключення корекції під час хитавиці вдалося зменшити похибку приблизно на 80%. У подальших роботах планується дослідити роботу гіровертикалі з пропорційно-інтегральною корекцією (яка також широко використовується) при хитавиці з автоматичним відключенням корекції.

**Abstract.** Vertical Gyro is a gyroscopic device for attitude (pitch, roll angles) determination. This article deals with the influence of the object oscillations on the Vertical Gyro error and its reduction. The reason of the Vertical Gyro error at oscillations is acceleration appeared at the place of the Vertical Gyro installation on the object. This acceleration disturbs gyro correction by accelerometers as level sensors. There are following popular types of the Vertical gyro correction: proportional, proportional-integral, constant, mixed, and strapdown Vertical Gyros use also the Kalman filter and its various modifications. The choice of one or another type depends on tasks to be solved and possibility to use complex correction types. This article investigates the Vertical Gyro with constant correction which has a number of advantages specifically when working at object acceleration. A technique for reducing the Vertical Gyro error is proposed which uses automatic switch off the correction by analysis of the level sensor signal. There is proposed a band-pass filter for this signal, technique for choice of parameters of the proposed switching-off algorithm that provides minimum of the Vertical Gyro error at oscillations. Example of calculation of these parameters is presented.

To check correctness of the calculations and to confirm the efficiency of the technique, data obtained during bench tests of the Inertial Labs MRU-B2 (Vertical Gyro built on micromechanical sensors) were used. A semi-physical simulation of the Vertical Gyro operation with the proposed method of reducing the error during oscillation was performed. This simulation results confirmed the effectiveness of the proposed method and the correctness of the analytical calculations. Due to the proposed switching off the correction during the oscillation, it was possible to reduce the initial error by approximately 80%. In further work, it is planned to investigate the operation of the Vertical Gyro with proportional-integral correction (which is also widely used) at oscillations, with correction automatic switch off.



**Ключові слова:** Гіровертикаль, система корекції, гіроскоп, акселерометр, індикатор горизонту, фільтр, хитавиця, прискорення.

**Key words:** Vertical Gyro, correction system, gyroscope, accelerometer, filter, oscillation, acceleration.

### Вступ і постановка задачі

Гіровертикаль (ГВ) – гіроскопічний прилад, який відтворює на борту об'єкта напрямком земної вертикалі і призначений для визначення орієнтації об'єкта відносно площини горизонту. Принципово ГВ може бути побудована на основі триступеневого гіроскопа або гіростабілізованої платформи у кардановому підвісі з індикаторами горизонту (акселерометрами) [1] або як безплатформна (безкарданна) система орієнтації (БСО) на основі гіроскопічних датчиків кутової швидкості (ДКШ) і акселерометрів [2].

Незважаючи на різні принципи побудови, основними причинами похибок ГВ є вплив прискорень руху об'єкта, а також похибки вимірювачів (гіроскопів і акселерометрів). При цьому залежність похибок ГВ від вказаних причин визначається не принципом побудови, а способом корекції гіроскопів за сигналами акселерометрів і значеннями параметрів цієї корекції. Для ГВ використовують наступні типи корекції [1]: пропорційна, пропорційно-інтегральна, змішана, а для безплатформної ГВ – ще і фільтр Калмана та його модифікації [3], [4].

Кожний із наведених типів корекції має свої переваги та недоліки, тому, залежно від поставлених завдань, раціонально буде застосувати саме той тип, який дозволить вирішити задачу з найкращим результатом. У даній статті досліджуються способи зменшення похибки ГВ при хитавиці об'єкта, коли виникають періодичні прискорення, які збуджують акселерометри як індикатори горизонту, а звідси – і систему корекції гіроскопів ГВ. Для дослідження раціонально вибрати постійну корекцію ГВ, яка має ряд переваг у порівнянні з іншими типами корекції саме при прискореннях руху [1]: менші похибки в умовах інтенсивного маневрування та хитавиці об'єкта, причому похибка при хитавиці не залежить від амплітуди прискорення.

У даній статті розглянуто вибір параметрів ГВ з постійною корекцією з точки зору мінімізації похибки при хитавиці, а також запропоновано і досліджено спосіб автоматичного відключення корекції ГВ з метою подальшого зниження похибки.

### Вибір швидкості постійної корекції

Розглянемо один канал роботи ГВ, наприклад, у визначенні кута крену. У ГВ з постійною корекцією рівняння руху має релейну залежність від сигналу індикатора горизонту (акселерометра) [1]:

$$\dot{\alpha} = -\omega_k \cdot \text{sign} \left( \alpha - \frac{W}{g} \right) - \omega_{\eta\Gamma} - \omega_{\text{др}} \quad (1)$$

де

$$a_{\eta\Gamma} = \alpha - \frac{W}{g} \quad (2)$$

– вихідний сигнал індикатора горизонту, приведений до кутових одиниць;  $\alpha$  – кут відхилення гіроскопу від вертикалі (похибка ГВ);  $W$  – проекція лінійного прискорення на вісь чутливості індикатора горизонту (збуджуючий сигнал);  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $\omega_k$  – швидкість постійної корекції;  $\omega_{\eta\Gamma}$  – кутова швидкість обертання траєкторної системи координат;  $\omega_{\text{др}}$  – кутова швидкість дрейфу гіроскопа, викликаного збуджуючими моментами.

Якщо ГВ встановлена не у центрі коливань об'єкта, а, наприклад, зміщена вздовж нормальної осі об'єкта на відстань  $z$ , то при гармонічній бортовій хитавиці з амплітудою  $\theta_m$  і частотою  $\omega$  у місці встановлення ГВ виникає гармонічне прискорення  $W$  з тією ж частотою і амплітудою

$$W_m = z\theta_m\omega^2 \quad (3)$$

Відзначимо, що причиною гармонічного прискорення може бути і лінійне коливання центру мас об'єкта під час руху.

За гармонічного прискорення виникне періодична похибка ГВ пилоподібної форми з амплітудою [1]

$$\alpha_m = \frac{\pi\omega_k}{2\omega} = \omega_k \frac{T}{4}, \quad (4)$$

де  $T = 2\pi/\omega$  – період коливань.

З виразу (4) випливає, що амплітуда похибки ГВ з постійною корекцією не залежить від амплітуди прискорення  $W_m$ , а залежить лише від його частоти  $\omega$ . Але, формула (4) справедлива тільки за умови [1]

$$\omega_k \frac{T}{4} < \frac{W_m}{g} \quad (5)$$

Якщо ця умова не виконується (через малу амплітуду прискорення  $W_m$  або великий період коливань  $T$ ), то похибка ГВ буде повторювати зміну прискорення, і амплітуда похибки буде максимальною:  $\alpha_m = \frac{W_m}{g}$ .



Як впливає з виразу (4), для зменшення похибки у ГВ з постійною корекцією необхідно зменшувати швидкість корекції  $\omega_k$ , але, з іншого боку, існує обмеження на мінімальну швидкість корекції [1]:

$$\omega_k > \left| \omega_{dp} \right| + \left| U \cos \varphi \right| + \frac{V_{\max}}{R}, \quad (6)$$

де  $U$  – кутова швидкість обертання Землі;  $R$  – радіус Землі;  $\varphi$  – широта;  $V_{\max}$  – максимальна швидкість руху об'єкта.

Якщо умова (6) не виконується, то ГВ з постійною корекцією втратить працездатність.

Відмітимо, що останні два доданки в (6) з'являються через проекції кутової швидкості  $\omega_{\eta T}$ ,  $\omega_{\zeta T}$  обертання траєкторної системи координат [1]

$$\omega_{\eta T} = U \cos \varphi \cos K; \quad \omega_{\zeta T} = \frac{V \sin K}{R} \operatorname{tg} \varphi + U \sin \varphi - \dot{K},$$

вплив яких можна компенсувати, якщо мати інформацію про курс  $K$  і швидкість  $V$  руху об'єкту, широту  $\varphi$ .

#### Вимкнення корекції ГВ під час хитавиці

Отже, зменшення похибки (4) ГВ з постійною корекцією при хитавиці за рахунок зменшення швидкості корекції  $\omega_k$  обмежене умовою (6). Для подальшого зменшення похибки пропонується використати спосіб, аналогічний вимкненню корекції ГВ при прискореннях руху об'єкта [1]. Розглянемо застосування цього способу для підвищення точності ГВ при хитавиці.

Пропонується замість додаткового акселерометра для вимірювання горизонтального прискорення, який, зазвичай, встановлюється на ГВ у кардановому підвісі [1], пропонується аналізувати вихідний сигнал  $a_{ir}$  (2) штатного індикатора горизонту ГВ (акселерометра). Якщо

$$\left| a_{ir} \right| > \frac{W_{\text{пор}}}{g} \quad (7)$$

де  $W_{\text{пор}}$  – задане порогове прискорення, то корекція гіроскопа вимикається, тим самим усуваючи збурення корекції прискоренням.

Однак безпосереднє використання  $a_{ir}$  (2) для аналізу (7) має два недоліки. По-перше, при якщо через якусь причину відбулось відхилення ГВ від вертикального положення на кут  $\alpha$ , більший порогу  $W_{\text{пор}}/g$ , то згідно (7) корекція гіроскопу вимкнеться, і більше не ввімкнеться, ГВ ніколи не повернеться до вертикального положення. По-друге, при малому порозі  $W_{\text{пор}}/g$  можливе вимкнення корекції через шум сигналу індикатора горизонту, який досить значний при використанні мікромеханічних акселерометрів у якості індикаторів горизонту, що дуже популярне останніми десятиліттями.

Вказані недоліки можна усунути, якщо використати смуговий фільтр для аналізу вихідного сигналу індикатора горизонту. Передатна функція такого фільтру має вигляд:

$$W(s) = \frac{T_1 s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (8)$$

де  $T_1$  та  $T_2$  – сталі часу фільтра,  $T_1 > T_2$ .

Асимптотична логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) смугового фільтру (8) має вигляд, показаний на рис. 1.

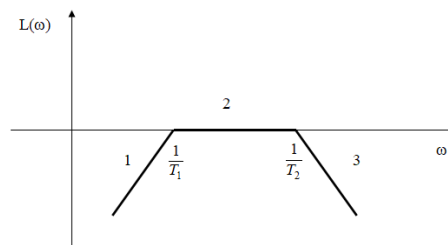


Рис. 1. – Асимптотична ЛАЧХ смугового фільтру

Для відключення корекції при хитавиці необхідно, щоб смуга пропускання фільтра перекривала можливий діапазон частот коливань  $\omega$  об'єкта, тобто:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} < \omega < \omega_2 = \frac{1}{T_2} \quad (9)$$

При цьому, на ділянках частот 1 та 3 (рис.1) відключення корекції гіроскопа не відбувається. Низькочастотна ділянка 1 забезпечує роботу корекції у випадку довготривалого відхилення ГВ від вертикального положення.



Високочастотна ділянка 3 забезпечує виконання умови про недоцільність вимикання корекції при високочастотних коливаннях об'єкта та придушує шум індикатора горизонту.

Якщо позначити через  $T_{\min}$  і  $T_{\max}$  мінімальний та максимальний можливі періоди хитавиці об'єкта, то умову (9) можна подати у наступному вигляді:

$$T_1 > \frac{T_{\max}}{2\pi}; \quad T_2 < \frac{T_{\min}}{2\pi}, \quad (10)$$

З одного боку, чим менший поріг  $W_{\text{пор}}$ , тим раніше буде вимикатися корекція, і меншою буде похибка ГВ, викликана прискоренням. Однак, існує обмеження на мінімальне значення  $W_{\text{пор}}$ . Можна показати, що фільтрування сигналу індикатора горизонту  $a_{\text{гр}}$  смуговим фільтром (8) при постійній швидкості дрейфу гіроскопу  $\omega_{\text{др}}$  призводить до постійного зміщення у фільтрованому сигналі  $a_{\text{грф}}$

$$a_{\text{грф.зм}} = T_1 \omega_{\text{др}}$$

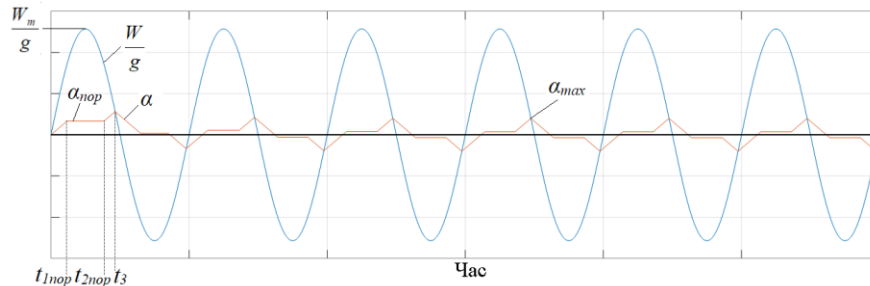
Вочевидь, при такій ситуації корекція гіроскопа повинна працювати на усунення цього зміщення, тому поріг відключення корекції повинен бути більшим:

$$\frac{W_{\text{пор}}}{g} > T_1 \omega_{\text{др}} \quad (11)$$

Розглянемо детально рух ГВ через вплив прискорення при хитавиці за наявності порогу відключення. Для цього залишимо у рівнянні (1) серед збурень тільки доданок, який зумовлений прискоренням:

$$\dot{\alpha} = -\omega_x^k \cdot \text{sign} \left( \alpha - \frac{W}{g} \right) \quad (12)$$

Побудуємо графік зміни прискорення  $W/g$  і похибки ГВ, викликаній цим прискоренням (рис. 2).



**Рис. 2. – Графік похибки ГВ при наявності порогу відключення корекції**

На початку руху при  $\alpha = 0$  розв'язок рівняння (12) має вигляд:

$$\alpha = \omega_k t, \quad (13)$$

оскільки  $W > 0$ .

Цей розв'язок буде дійсним до моменту часу  $t_{1\text{пор}}$ , коли сигнал індикатора горизонту (вираз у дужках (12)) не досягне порогового значення:

$$\left( \alpha - \frac{W_m}{g} \right) = \frac{W_{\text{пор}}}{g}$$

У цей момент корекція ГВ вимкнеться, рівняння (12) набуває вигляду  $\dot{\alpha} = 0$ , а його розв'язок:

$$\alpha = \text{const} = \alpha_{\text{пор}}$$

де  $\alpha_{\text{пор}}$  – величина похибки (13) при  $t = t_{1\text{пор}}$ .

Через деякий час  $t_{2\text{пор}}$ , внаслідок зменшення прискорення  $W$ , вираз у дужках (12) стане більше порогу  $W_{\text{пор}}/g$ , корекція ввімкнеться і наростання похибки  $\alpha$  продовжиться до тих пір  $t_3$ , коли похибка зрівняється з прискоренням.

Після цього величина прискорення почне зменшуватися, вираз у дужках формули (12) змінить знак на додатний,  $\dot{\alpha} < 0$ , і, відповідно, графік похибки на рис. 2 почне зменшуватись.

У результаті відбуватимуться періодичні коливання з відключенням корекції на проміжках часу від  $t_{1\text{пор}}$  до  $t_{2\text{пор}}$ , як і показано на рис. 2. Максимальна похибка  $\alpha_{\text{max}}$  за умови малого порогу відключення  $W_{\text{пор}} \ll W_m$  може бути оцінена величиною:

$$\alpha_{\text{max}} < 2 \frac{W_{\text{пор}}}{g} \cdot \frac{\chi}{(2\chi+1)(\chi-1)}, \quad (14)$$



де відносна величина

$$\chi = \frac{W_m}{g} \cdot \frac{\omega}{\omega_k} \quad (15)$$

Можна показати, що при виконанні умови (5) значення  $\chi > \pi/2$ .

Отримаємо обмеження зверху на поріг відключення  $W_{\text{пор}}$  за якого похибка  $\alpha_{\text{max}}$  (14) буде меншою ніж похибка  $\alpha_m$  (4) без відключення корекції, тобто умову, коли таке відключення ефективне. Підставляючи вирази (14), (4) у умову  $\alpha_{\text{max}} < \alpha_m$ , отримаємо:

$$\frac{W_{\text{пор}}}{g} < \frac{\pi \omega_k}{4\omega} \cdot \frac{\chi}{(2\chi+1)(\chi-1)} \quad (16)$$

Таким чином, запропоноване відключення корекції гіроскопу ГВ за сигналом індикатора горизонту повинно зменшує похибку ГВ при хитавиці, якщо виконана умова (10) вибору сталих часу смугового фільтра і порогу відключення корекції (11) та (16).

### Приклад розрахунку параметрів ГВ для мінімізації похибки при хитавиці

Для розрахунку параметрів корекції задамо наступні вимоги: нехай можливий період коливань об'єкту становить  $T_{\text{min}} = 2,5$  с,  $T_{\text{max}} = 15$  с, а дрейф гіроскопа  $\omega_{\text{др}} = 0,02$  °/с. Згідно з визначеними вимогами, необхідно розрахувати параметри постійної корекції таким чином, щоб мінімізувати похибку визначення кутів орієнтації.

Для початку розрахуємо смугу пропускання смугового фільтра за формулою (10):

$$T_1 > \frac{T_{\text{max}}}{2\pi} = \frac{15}{6,28} = 2,38\text{с}; \quad T_2 < \frac{T_{\text{min}}}{2\pi} = \frac{2,5}{6,28} = 0,39\text{с}$$

Виберемо  $T_1 = 2,4$  с;  $T_2 = 0,3$  с.

Згідно до заданих вимог, дрейф гіроскопа становить  $\omega_{\text{др}} = 0,02$  °/с = 0,00035 рад/с. Виберемо швидкість корекції таким чином, щоб виконувалась умова (6), у якій можна знехтувати двома останніми доданками, які набагато менші за дрейф гіроскопа:  $\omega_k > \omega_{\text{др}}$ . Оберемо з запасом  $\omega_k = 0,0007$  с<sup>-1</sup>.

При цьому максимальна похибка ГВ згідно (4) матиме значення від 0,025° до 0,2° при вказаних періодах коливань від 2,5 с до 15 с.

Для реалізації відключення корекції розрахуємо порогове значення прискорення за формулою (11):

$$W_{\text{пор}} > 2,4 \cdot 0,00035 \cdot 9,81 = 0,008 \text{ м/с}^2$$

Приймемо з запасом  $W_{\text{пор}} = 0,01$  м/с<sup>2</sup>.

Щоб розрахувати максимальну похибку  $\alpha_{\text{max}}$  при відключенні корекції за формулами (14), (15) задамо амплітуду прискорення при хитавиці  $W_m = 0,1$  м/с<sup>2</sup> і період коливань  $T=10$  с (що відповідає частоті коливань  $\omega = 2\pi/T = 0,63$  рад/с). В результаті отримаємо максимальну похибку ГВ  $\alpha_{\text{max}} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  рад = 0,007°.

### Експериментальні дослідження

Для експериментальної перевірки результатів дослідження були використані дані, отримані під час стендових випробувань гіровертикалі MRU-B2 компанії Inertial Labs [5], побудованої на мікроемеханічних датчиках. ГВ була встановлена на платформі гексапода E-Motion 8000 фірми Bosch Rexroth, який може задавати рух своєї платформи у трьох поступальних напрямках і кутовий рух навколо трьох осей, з вимірюванням дійсного положення платформи з високою точністю.

На рис. 3 представлений фрагмент одного з тестів ГВ, у якому задавались гармонійні коливання по куту крену з амплітудою  $\theta_m = 5^\circ$ , періодом  $T = 10$  с. ГВ була встановлена на висоті 0,85 м відносно центру качання. Тобто амплітуда прискорення в місці встановлення ГВ (3) становила  $W_m = 0,03$  м/с<sup>2</sup>.

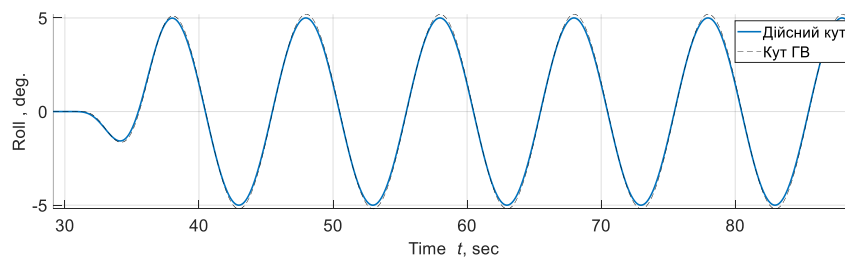


Рис. 3. – Графіки еталонного кута крену і кута, визначеного ГВ

Виконано напівнатурне моделювання роботи ГВ з запропонованим способом зменшення похибки при хитавиці. Для цього були використані записи вихідних сигналів датчиків ГВ (гіроскопів і акселерометрів) під час тесту, оброблені алгоритмом безплатформної ГВ з постійною корекцією, з параметрами, розрахованими вище:



$$\omega_k = 0.0007 \text{ c}^{-1}; T_1 = 2,4 \text{ c}; T_2 = 0,3 \text{ c}; W_{\text{пор}} = 0,01 \text{ м/с}^2.$$

Розрахункові значення похибки ГВ  $\alpha_m$  (4) без відключення корекції і  $\alpha_{\text{max}}$  (14) при відключенні корекції, переведені з радіан у градуси:

$$\alpha_m = 0,1^\circ; \alpha_{\text{max}} = 0,03^\circ. \quad (17)$$

Результати напівнатурного моделювання роботи ГВ представлені на рис. 4 графіками похибки у порівнянні з дійсним кутом крену.

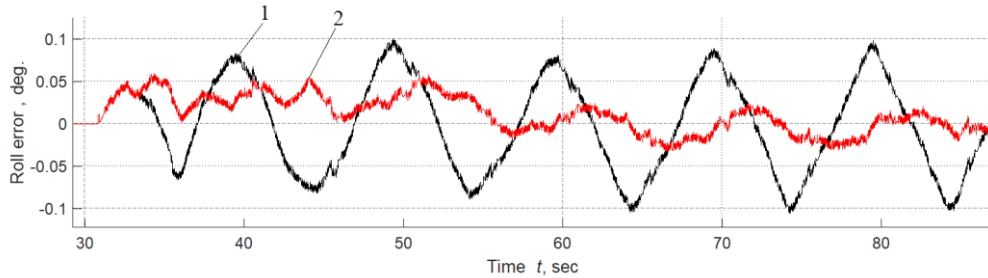


Рис. 4. – Похибки визначення кута крену: 1 – без відключення корекції, 2 – з відключенням

Як видно на рис. 4, амплітуда похибки без відключення корекції становить приблизно  $0.1^\circ$ , а з відключенням корекції – приблизно  $0,021^\circ$ , що добре узгоджується з розрахованими значеннями (17).

Таким чином, запропонований спосіб відключення корекції ГВ при хитавиці дозволяє суттєво зменшити похибку ГВ, а наведена методика дозволяє коректно вибрати значення параметрів алгоритму відключення і оцінити похибку ГВ.

У подальшому планується дослідити відключення корекції при хитавиці для ГВ з пропорційно-інтегральною корекцією, яка широко використовується у ГВ.

#### Висновок

В роботі розглянутий спосіб зменшення похибки гіровертикалі при хитавиці об'єкта. Запропоновано використання постійної корекції з фільтрацією сигналу корекції для автоматичного відключення останньої. Наведений приклад розрахунку параметрів системи корекції за запропонованою методикою. Результати напівнатурного моделювання з використанням реальних даних тесту гіровертикалі на стенді хитавиці підтвердили високу ефективність запропонованого способу і відповідність результатів розрахунковим значенням. У майбутньому планується дослідити роботу гіровертикалі з пропорційно-інтегральною корекцією при хитавиці з автоматичним відключенням корекції.

#### Список літератури

- [1]. Бороздин В. Н. Гироскопические приборы и устройства систем управления / В. Н. Бороздин. - М.: Машиностроение, 1990. - 272 с.
- [2]. Ривкин С.С., Берман З.М., Окон И.М. Определение параметров ориентации объекта бесплатформенной инерциальной системой. - СПб: ЦНИИ "Электроприбор", 1996. - 226 с.
- [3]. D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell and B. W. Parkinson, "A gyro-free quaternion-based attitude determination system suitable for implementation using low cost sensors", *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, pp. 185-192, 2000. doi: 10.1109/ PLANS.2000.838301.
- [4]. K. Feng et al., "A New Quaternion-Based Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation Using the Two-Step Geometrically-Intuitive Correction Algorithm", *Sensors (Basel)*, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17092146>
- [5]. Inertial labs. Motion Reference Units MRU. URL: [https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2022/01/MRU\\_Datasheet.rev3\\_3\\_Jan\\_2022-1.pdf](https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2022/01/MRU_Datasheet.rev3_3_Jan_2022-1.pdf) (дата звернення: 19.09.2022)

#### References

- [1]. Borozdin V. N. Giroskopicheskie pribory i ustroystva sistem upravleniya / V. N. Borozdin. - M.: Mashinostroenie, 1990. - 272 с.
- [2]. Rivkin S.S., Berman Z.M., Okon I.M. Opredelenie parametrov orientatsii ob'ekta besplatformennoy inertsiyalnoy sistemoy. - SPb: TsNII "Elektropribor", 1996. - 226 с.
- [3]. D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell and B. W. Parkinson, "A gyro-free quaternion-based attitude determination system suitable for implementation using low cost sensors", *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, pp. 185-192, 2000. doi: 10.1109/ PLANS.2000.838301.
- [4]. K. Feng et al., "A New Quaternion-Based Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation Using the Two-Step Geometrically-Intuitive Correction Algorithm", *Sensors (Basel)*, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17092146>
- [5]. Inertial labs. Motion Reference Units MRU. URL: [https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2022/01/MRU\\_Datasheet.rev3\\_3\\_Jan\\_2022-1.pdf](https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2022/01/MRU_Datasheet.rev3_3_Jan_2022-1.pdf) (data zvernennia: 19.09.2022)

Отримана в редакції 29.08.2022. Прийнята до друку 12.09.2022. Received 29 August 2022. Approved 12 September 2022. Available in Internet 30 September 2022.